

PENGESAHAN

**PREDIKSI WAKTU PURIFIKASI MINYAK TRANSFORMATOR
BERDASARKAN BERBAGAI METODE ANALISA DGA**

TUGAS AKHIR

Oleh :

JUNALDI UNGGAL SIHOTANG

NPM : 10330009

Lulus Sidang Tugas Akhir tanggal : 27 September 2024

Periode Semester GLNAP I.A 2023/2024

Disahkan dan disetujui oleh :

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Liliatuko Sianturi, S.T., M.T.

NIDN : 0120057701



Ir. Jozzer Manjburak, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng

NIDN : 0122047302

Diketahui Oleh :

Ketua Program Studi Teknik Elektro



Ir. Lestina Stagian, M.Si

NIDN : 0120125901



Program Studi Teknik

Dr. Pr. Timbang Pangaribuan, M.T.

NIDN : 0121026402

BAB I

1.1 Latar Belakang **PENDAHULUAN**

Dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik di Indonesia, diperlukan pembangkitan listrik dalam skala besar untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Transformator merupakan komponen krusial dalam infrastruktur pembangkitan listrik, namun sering kali mengalami kegagalan (*breakdown*) karena minimnya perhatian dan perawatan yang diberikan padanya.

Di dalam transformator, minyak berfungsi sebagai pendingin dan isolator. Gas-gas yang terkandung dalam minyak transformator dapat menyebabkan kegagalan, yang disebut sebagai gas kerusakan (*fault gas*). Pengujian DGA (*Dissolved Gas Analysis*) digunakan untuk mengidentifikasi jenis kerusakan pada transformator yang telah beroperasi selama bertahun-tahun (Golarz, 2016). Dalam pengujian DGA, gas-gas kerusakan seperti H₂, CH₄, CO, CO₂, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂, O₂, N₂, dan O₂N₂ sering kali tidak terdeteksi selama pengujian karakteristik minyak. Saat transformator beroperasi terus-menerus, senyawa-senyawa ini dapat terurai menjadi unsur C-H. Pemecahan ikatan tersebut menjadi salah satu penyebab utama kegagalan transformator, seperti kegagalan termal, kegagalan elektrik (tegangan tembus), dan arcing yang dapat berpotensi menimbulkan kebakaran.

Pada tahun 2008, Rahmat Hardityo melakukan penelitian berjudul “Deteksi dan Analisis Indikasi Kegagalan Transformator dengan Metode Analisis Gas Terlarut.” Penelitian ini berfokus pada menemukan penyebab kegagalan transformator melalui hasil pengujian DGA, yang kemudian dianalisis menggunakan metode TDCG (*Total Dissolved Combustible Gas*), Roger’s Ratio, Key Gas, dan Duval’s Triangle. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Dimas Aditia Arifianto dengan judul “Analisis Kegagalan Transformator di PT Asahimas Chemical Banten Berdasarkan Hasil Uji DGA dengan Metode Roger’s Ratio.” Penelitian ini berfokus pada pengujian minyak transformator baru, minyak yang sedang digunakan, dan minyak yang sudah rusak. Hasil pengujian DGA pada minyak-minyak tersebut dianalisis untuk menentukan penyebab kegagalan transformator dengan metode Roger’s Ratio.

Penelitian ini membahas analisis pengujian DGA dengan objek transformator di PT PLN (Persero) Gardu Induk Titi Kuning Medan, menggunakan metode analisis TDCG (Total Dissolved Combustible Gas) dan Roger's Ratio. Hasil analisis pertumbuhan gas terlarut dalam minyak transformator yang diuji dimanfaatkan untuk memprediksi rentang waktu yang tepat untuk melakukan purifikasi minyak transformator. Penelitian ini juga menggunakan aplikasi Matlab untuk melihat *trend* rentang waktu dilakukannya purifikasi berdasarkan data pengujian DGA terakhir. Prediksi waktu purifikasi penting dilakukan sebagai upaya pencegahan dari *breakdown* pada minyak transformator yang dalam pelaksanaannya tidak diprediksi oleh utilitas terkait.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi jenis kegagalan pada transformator berdasarkan hasil uji DGA.
2. Memprediksi waktu yang tepat untuk purifikasi minyak transformator.

1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan dibatasi agar tetap fokus pada topik yang dibahas. Adapun batasan masalah dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Skripsi ini hanya menganalisis kegagalan transformator berdasarkan berbagai indikasi pada minyak trafo sesuai dengan standar, tanpa membahas penyebab pasti kegagalan minyak transformator.
2. Skripsi ini hanya membahas uji DGA yang dilakukan menggunakan metode ekstraksi Gas Chromatograph.
3. Gas yang dianalisis merupakan gas yang dihasilkan oleh minyak transformator pada tangki utama transformator.
4. Metode analisis gas terlarut yang digunakan terbatas pada metode TDCG (Total Dissolved Combustible Gas) dan Roger's Ratio.
5. Skripsi ini hanya memprediksi rentang waktu purifikasi minyak transformator berdasarkan data TDCG dalam satuan ppm/hari, tanpa membahas waktu pasti untuk pelaksanaan purifikasi.

1.4 Tujuan Dan Manfaat Penelitian

Tujuan dan manfaat dari penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui jenis kegagalan pada transformator dari hasil uji DGA minyak transformator yang diuji.
2. Memprediksi rentang waktu purifikasi minyak transformator yang diuji.

1.5 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam perencanaan tugas akhir ini adalah metode kuantitatif. Menurut Creswell, perencanaan kuantitatif merupakan salah satu jenis perencanaan di mana peneliti menentukan apa yang akan diteliti, menyusun pertanyaan-pertanyaan spesifik, membatasi ruang lingkup pertanyaan, mengumpulkan data, dan menganalisis angka-angka menggunakan statistik.

Dalam tugas akhir ini, beberapa metode digunakan untuk memperoleh data yang relevan dengan penelitian. Metode-metode tersebut meliputi:

1. Metode Literatur: Pengumpulan data dari berbagai referensi, buku, dan jurnal yang terkait dengan topik tugas akhir ini untuk memahami dasar-dasar teori yang mendukung penulisan.
2. Metode Observasi: Pengamatan langsung di lokasi yang direncanakan untuk mengumpulkan data terkait perencanaan.
3. Penggunaan Multimedia: Penggunaan internet, perangkat lunak, serta alat digital lainnya untuk mengumpulkan, menganalisis, dan mengolah data sesuai perencanaan.

Prosedur penelitian ini terdiri dari beberapa tahap: studi literatur, pengumpulan data, dan analisis data. Studi literatur bertujuan mengidentifikasi masalah yang relevan dengan topik penelitian. Pengumpulan data dilakukan untuk melengkapi informasi yang diperlukan, sementara analisis data bertujuan mengevaluasi hasil penelitian melalui simulasi atau kalkulasi ilmiah.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi dengan judul “Prediksi Waktu purifikasi Minyak Transformator Berdasarkan Berbagai Metode Analisa DGA” adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Membahas latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Membahas teori-teori yang digunakan sebagai landasan dalam penelitian.

BAB III: METODE PENELITIAN

Membahas metode penelitian, termasuk studi literatur, objek penelitian, variabel penelitian, pengumpulan data, analisis, dan penarikan kesimpulan.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Melakukan perhitungan serta analisis data.

BAB V: PENUTUP

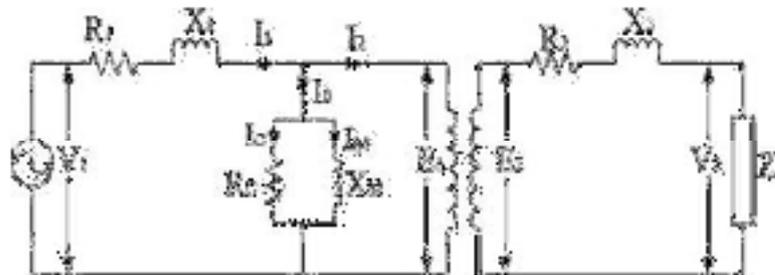
Menyajikan kesimpulan dan saran.

BAB II

LANDASAN TEORI

1.1 Transformator

Transformator adalah perangkat listrik yang mampu mentransfer dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian lain melalui hubungan magnetis berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, tanpa mengubah frekuensinya (Siburian, 2019). Transformator terdiri dari kumparan primer dan sekunder. Prinsip kerjanya adalah, ketika kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik, fluks bolak-balik terbentuk di dalam inti. Karena kumparan ini membentuk rangkaian tertutup, arus primer pun mengalir. Fluks di kumparan primer kemudian menginduksi kumparan sekunder, dan jika rangkaian sekunder diberi beban, arus sekunder mulai mengalir, sehingga energi listrik dapat ditransfer melalui proses magnetisasi. Diagram sederhana dari sebuah transformator ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Sebuah Transformator.

Dimana:

V_1 = tegangan sisi primer

I_1 = arus sisi primer

N_1 = jumlah lilitan pada sisi primer

V_2 = tegangan sisi sekunder

I_2 = arus sisi sekunder

N_2 = jumlah lilitan pada sisi sekunder

2.1.1 Rugi-rugi Pada Transformator

2.1.1.1 Rugi-rugi Inti

a. Rugi Histeresis

Rugi *histeresis* terjadi akibat fluks (Φ) bolak-balik di dalam inti besi. Pada besi yang mengalami fluks bolak-balik, rugi *histeresis* per siklus sebanding dengan luas kurva (loop) *histeresis*. (Prabowo, 2018).

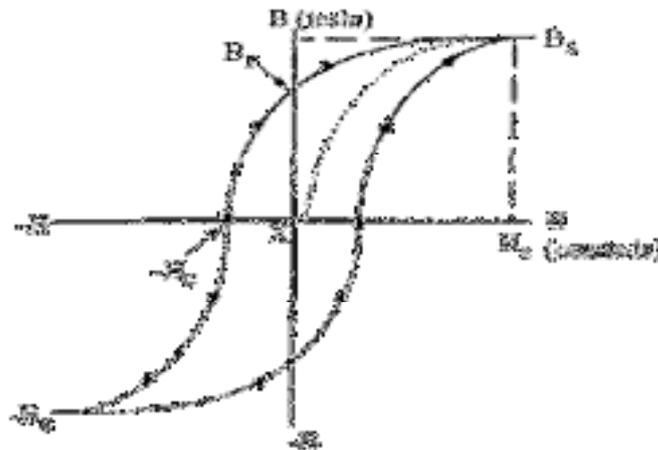
$$P_h = K_h B_m^2 f \quad (2.1)$$

Dimana:

K_h = konstanta *Hysterisis*

f = frekuensi (Hz)

B_m = kerapatan fluks maksimum (Tesla)

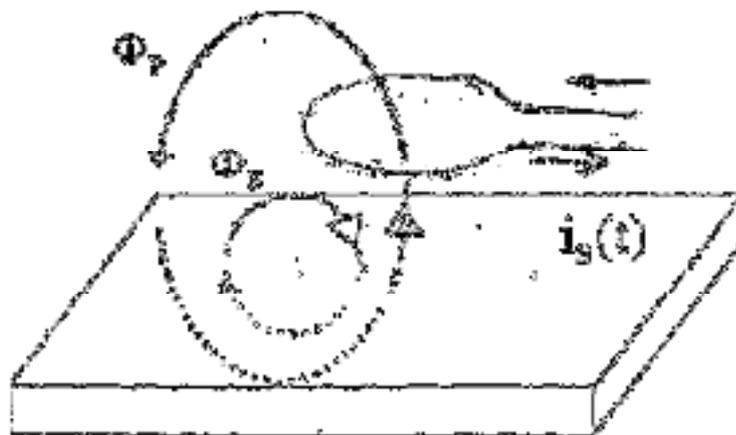


Gambar 2.2 Kurva *Hysterisis* (Paripurna, 2011).

Ketika kuat medan magnet (H) diperbesar, akan tercapai titik jenuh, di mana rapat fluks magnet (B) tidak lagi meningkat. Luas kurva B - H yang terbentuk saat kuat medan magnet (H) dinaikkan dan diturunkan menggambarkan rugi histeresis, yang akan hilang dalam bentuk panas (Paripurna, 2011).

b. Rugi-rugi Arus Eddy

Penyebab rugi ini adalah pemanasan pada inti besi akibat arus yang terinduksi dalam inti dan perbedaan tegangan di antara sisinya, yang menghasilkan arus berputar pada area yang lebih luas atau tebal. Arus eddy muncul karena adanya fluks magnetik, di mana perbedaan tegangan antara sisi-sisinya menyebabkan perubahan fluks tersebut. Pada dasarnya, induksi tegangan dalam inti besi serupa dengan prinsip transformator (di mana setiap lempeng besi dapat dianggap sebagai kumparan sekunder yang terhubung singkat), sehingga emf induksi pada inti berbanding lurus dengan fluks ($e = 4.44fn\Phi$). Impedansi inti yang dialiri arus dianggap konstan pada laminasi tipis dan tidak bergantung pada frekuensi, terutama pada frekuensi rendah atau frekuensi daya listrik (Prabowo, 2018).



Gambar 2.3 Ilustrasi timbulnya arus *eddy* (Prabowo, 2018)

Sehingga dapat di tulis persamaan:

$$P_e = K_e f^2 B^2 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

P_e = Konstanta arus *eddy*

f = frekuensi (Hz)

B_m = kerapatan fluks maksimum (Tesla)

2.1.1.2 Rugi-rugi Tembaga

Rugi tembaga merupakan kerugian yang terjadi pada konduktor atau tembaga yang digunakan sebagai material pembuat kumparan. Kerugian ini disebabkan oleh adanya resistansi dalam bahan kumparan (Prayoga, 2010). Nilai resistansi konduktor dapat dihitung menggunakan rumus pada persamaan 2.3.

$$R = \frac{\rho l}{A} \dots\dots\dots (2.3)$$

- Dimana:
- R = Tahanan (Ohm)
 - ρ = Tahanan jenis (Ohm.m)
 - l = Panjang (m)
 - A = Luas Penampang (m²)

Untuk menghitung rugi-rugi tembaga pada sisi primer, sekunder, dan inti, dapat digunakan rumus pada persamaan 2.4, 2.5, dan 2.6 berikut.

$$P_1 = I_1^2 R_1 \dots\dots\dots (2.4)$$

$$P_C = I_C^2 R_C \dots\dots\dots (2.5)$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.6)$$

- Dimana :
- P_1 = Rugi-rugi sisi primer
 - I_1 = Arus pada sisi primer
 - R_1 = Resistansi pada sisi primer
 - P_C = rugi-rugi pada inti
 - I_C = Arus pada inti
 - R_C = Resistansi pada inti
 - P_2 = Rugi-rugi sisi sekunder
 - I_2 = Arus pada sisi sekunder

Perhitungan fluks bocor pada sisi primer dan sekunder dapat dilihat melalui persamaan 2.7 dan 2.8 berikut.

$$\Phi_{LP} = I_1^2 X_1 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\Phi_{LS} = I_2^2 X_2 \dots\dots\dots (2.8)$$

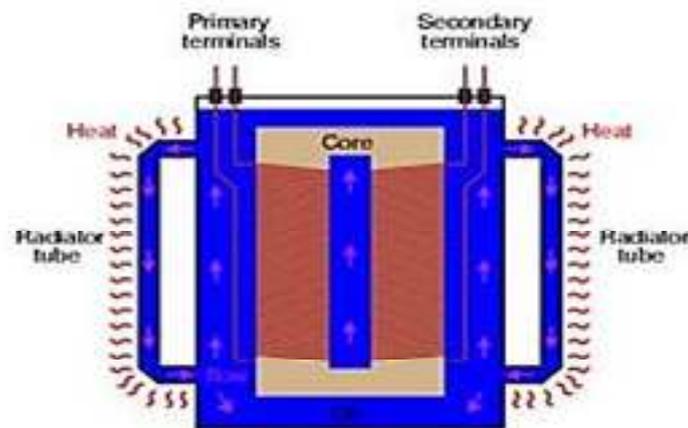
Dimana:

Φ_{LP} = fluks bocor pada primer

Φ_{LS} = fluks bocor pada sekunder

2.1.2 Minyak Transformator Sebagai Isolator Cair

Dalam sistem transmisi, isolator berfungsi untuk memisahkan dua atau lebih konduktor listrik yang bertegangan, sehingga mencegah terjadinya hubungan pendek atau short circuit antara konduktor (Syakur, A., Facta, M., et al., 2005). Minyak yang digunakan sebagai isolator dalam transformator berperan sebagai pemisah antar winding, pemadam ketika terjadi busur api, serta melindungi transformator dari kerusakan yang bersifat korosif, seperti karat, seperti yang terlihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Minyak Pada Transformator

Penggunaan transformator secara terus-menerus dapat menyebabkan peningkatan suhu pada transformator, termasuk pada minyak yang terdapat dalam tangki utama. Minyak transformator pada dasarnya mengandung hidrokarbon yang terlarut. Kenaikan suhu pada minyak transformator dapat mengakibatkan peningkatan jumlah gas yang mengandung hidrokarbon dalam minyak tersebut. Peningkatan kadar gas terlarut ini dapat berpotensi menyebabkan kegagalan pada transformator.

Oleh karena itu, penting untuk melakukan pemantauan dan perawatan terhadap minyak transformator agar tetap dalam kondisi standar yang ditetapkan. Berikut adalah karakteristik minyak transformator:

a. Kejernihan

Kejernihan minyak isolasi tidak boleh mengandung suspensi atau endapan (sedimen). Semakin banyak endapan dalam minyak, semakin buruk kualitas minyak tersebut. Menurut standar, warna minyak transformator yang baik harus jernih dan bersih (bening).

b. Massa Jenis

Massa jenis minyak transformator harus lebih rendah dari massa jenis air. Pembatasan massa jenis ini bertujuan agar air tidak dapat terpisah dari minyak isolasi dan tidak mengapung.

c. Viskositas Kinematika

Viskositas memiliki peranan penting dalam proses pendinginan, yaitu untuk menentukan kelas minyak. Semakin tinggi nilai viskositas minyak, semakin efektif proses pemindahan panas thermal pada minyak transformator.

d. Titik Nyala

Titik nyala yang rendah pada minyak menunjukkan adanya indikasi kontaminasi oleh zat-zat yang mudah terbakar.

e. Angka Kenetralan

Angka kenetralan menunjukkan tingkat penurunan asam dalam minyak dan dapat mendeteksi kontaminasi, serta menunjukkan kecenderungan reaksi kimia atau indikasi reaksi kimia dalam bahan tambangan.

f. Korosi

Korosi dapat terjadi akibat adanya belerang bebas atau senyawa belerang yang tidak stabil dalam minyak isolasi. Korosi juga bisa disebabkan oleh campuran uap air dalam minyak.

g. Tegangan Tembus

Tegangan tembus pada minyak transformator mempengaruhi kemampuan dielektrik minyak tersebut. Tegangan tembus yang terlalu rendah menandakan adanya kontaminasi seperti air, kotoran, atau partikel konduktif dalam minyak.

h. Kandungan Air

Keberadaan air dalam minyak isolasi akan menurunkan tegangan tembus dan resistivitas minyak, yang dapat mempercepat kerusakan atau menyebabkan kegagalan kinerja transformator. Standar spesifikasi minyak transformator menurut IS 335 – 1983 dan BS 148 – 1972 ditunjukkan dalam tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi Minyak Transformator Menurut IS 335 – 1983 dan BS 148 – 1972

No	Karakteristik	IS 335 – 1983	BS 148 – 1972
1	<i>Density at</i>	27°C (max) 0.89 g/cm ²	20°C (max) 0.89 g/cm ²
2	<i>Kinematic viscosity</i>	27°C (max) 27 Cδt	20°C (max) 40 Cδt
3	<i>Interfacial tension</i>	27°C min 0.07 N/m	
4	<i>Flash point</i>	140°C	140°C
5	<i>Pour Point</i>	max – 9°C	Max – 30°C
6	<i>Neutralization value</i>	max 0.03 mg KOH/gm	max 0.03 mg KOH/gm
7	<i>Corrosive Sulphur</i>	Non Corrosive	
8	<i>Electric Strength (breakdown voltage)</i> <i>(a) As received in Drums</i> <i>(b) After filteration</i>	 Min 30 kV Min 50 kV	 Min 30 kV

9	<i>Dielectric dissipation factor (tan-delta)</i>	90°C max 0.005	90°C max 0.005
10	<i>Specific resistance (resistivity) min</i> <i>(a) at 90°C</i> <i>(b) at 27°C</i>	min 30 ×10 ¹² Ω cm min 500 ×10 ¹² Ω cm	No set limit
11	<i>Oxidation stability Neutralization value after oxidation Total studge ofteroxidation, max</i>	max 0.40 mg KOH/gm max 0.10 % by weight	max 0.03 mg KOH/gm 0.10 %
12	<i>Presence of oxidation inhibitor</i>	<i>The Oil shall not contain antioxidant dditives</i>	-
13	<i>Sulphur</i>	-	Nil
14	<i>Water content as received in drums as received in bulk</i>	max 50 ppm by weight	max 50 ppm max 35 ppm

2.1.3 Minyak Transformator Digunakan Sebagai Pendingin

Pembebanan pada transformator menyebabkan terjadinya rugi-rugi, yang menghasilkan panas pada inti besi dan lilitan, sehingga suhu minyak transformator meningkat. Pendinginan transformator diperlukan untuk menurunkan suhu agar tetap berada di bawah batas yang ditentukan. Minyak transformator, sebagai isolator cair, digunakan untuk mengisi ruang-ruang dalam transformator, termasuk ruang antara lilitan coil pada winding. Minyak berfungsi menyerap panas dan mendistribusikannya, kemudian melepaskan panas tersebut ke atmosfer. Tipe-tipe pendinginan yang digunakan pada transformator dapat dilihat pada Tabel 2.2.

No.	Simbol	Arti	Deskripsi
1	A.N	Air Natural	Udara sekitar digunakan untuk pendinginan. Metode ini biasanya dipakai untuk transformator tipe kering dengan kapasitas daya s.d 1.5 MVA.
2	A.F	Air Force	Metode ini juga digunakan pada transformator tipe kering. Udara ditiupkan paksa ke permukaan tangki untuk menambah laju disipasi panas. Kipas-kipas pendingin dinyalakan saat temperatur pada belitan meningkat di atas batas yang diperbolehkan.
3	O.N.A.N	Oil Natural Air Natural	Metode ini banyak digunakan oleh transformator dengan kapasitas daya s.d 30 MVA. Transformator dipasangi radiator tipe sirip untuk sirkulasi minyak secara alami/natural.
4	O.N.A.F	Oil Natural Air Force	Metode ini banyak digunakan oleh transformator dengan kapasitas daya antara 30 MVA dan 60 MVA. Menggunakan radiator tipe sirip yang dilengkapi dengan kipas pendingin. Kipas-kipas dinyalakan saat pembebanan yang berat saja.
5	O.F.A.F	Oil Force Air Force	Metode ini digunakan untuk transformator dengan kapasitas daya di atas 60 MVA. Minyak isolator disirkulasikan melewati radiator menggunakan pompa. Tiap-tiap radiator memiliki kipas pendingin untuk pertukaran panas dari minyak ke udara.
6	O.F.W.F	Oil Force Water Force	Panas ditransfer melalui minyak dan air yang disirkulasikan melalui saluran pembuangan panas menggunakan pompa. Digunakan pada kondisi lingkungan tertentu seperti temperatur sekitar tinggi, pada pabrik besi, ruangan bawah tanah, dan lain-lain.

Tabel 2.2 Tipe-tipe pendingin pada Transformator Daya (IEEE Std. C57.12.00-2010)

Pendinginan dengan menggunakan minyak transformator dikombinasikan dengan menggunakan kipas (*fan*) agar pemindahan panas dapat optimal. Pemilihan tipe pendinginan pada transformator disesuaikan dengan rating transformator, transformator dengan rating cukup besar umumnya menggunakan kombinasi dari 3 tipe pendinginan yaitu ONAN, ONAF, dan OFAF (Rahmat, 2008).

2.2 Purifikasi Minyak Transformator

Purifikasi minyak transformator merupakan salah satu perawatan yang bertujuan untuk memurnikan minyak dari endapan debu atau kotoran, menghilangkan uap air, dan meningkatkan kekuatan dielektrik minyak.

Prinsip kerja purifikasi melibatkan pemanasan minyak transformator hingga suhu tertentu yang tetap konstan. Pemanasan ini bertujuan untuk memisahkan air dari minyak, di mana air akan menguap dan terlepas ke udara. Setelah pemanasan, minyak akan dikabutkan untuk memisahkan antara minyak dan uap. Selanjutnya, minyak tersebut di-vakum dengan tekanan 0,68 bar untuk memisahkan uap air dan kandungan asam dalam minyak. Minyak yang telah di-vakum kemudian disaring dan dipadatkan untuk mencegah gelembung udara di dalam minyak yang sudah dipurifikasi (Destario, 2008).

Pengujian tegangan tembus pada minyak dilakukan kembali setelah proses purifikasi untuk mengetahui nilai tegangan tembus minyak. Jika nilai tegangan tembus masih di atas batas standar IEC-156, maka kekuatan dielektrik minyak telah menurun, dan minyak transformator perlu diganti dengan yang baru. Beberapa utilitas memiliki standar nilai tegangan tembus yang dapat ditolerir, sehingga penggantian minyak dapat ditunda.

Proses purifikasi minyak transformator dilakukan secara berulang. Berdasarkan standar PLN dalam manual buku produk trafo, proses purifikasi untuk minyak baru hanya memerlukan 2-3 sirkulasi, sedangkan minyak yang sudah lama membutuhkan 4-6 sirkulasi. Durasi proses purifikasi tergantung pada kapasitas minyak di dalam trafo. Satu liter minyak membutuhkan waktu sekitar \pm 17 menit untuk satu kali sirkulasi. Oleh karena itu, minyak baru memerlukan waktu purifikasi sekitar \pm (34-51) menit, sedangkan minyak lama membutuhkan waktu \pm (68-102) menit.

Selain berfungsi sebagai pendingin, minyak transformator juga berperan sebagai isolator cair. Kekuatan dielektrik minyak harus selalu memenuhi standar IEC-156. Untuk memastikan tegangan tembus sesuai dengan standar, perlu dilakukan perawatan minyak transformator melalui purifikasi. Standar tegangan tembus minyak transformator menurut IEC-156 dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Standar Tegangan Tembus Minyak Transformator IEC-156 (IEC Publication 156).

Tegangan Operasi Trafo (kV)	Jarak Gap (mm)	1. Nilai Minimum(kV)
$Un \leq 36$	2,5	30
$36 < Un \leq 70$	2,5	35
$70 < Un \leq 170$	2,5	40
$170 < Un$	2,5	45

Sebelum melakukan pemurnian minyak, penting untuk melakukan pengujian tegangan tembus guna mengetahui nilai tegangan tembus minyak tersebut (Destario, 2008). Jika hasil uji menunjukkan bahwa nilai tegangan tembus minyak berada di bawah standar IEC, maka purifikasi minyak perlu dilakukan.

Purifikasi minyak transformator tidak mengubah nilai gas terlarut yang diukur dalam pengujian DGA secara permanen. Jika transformator terindikasi mengalami kegagalan, proses purifikasi dapat menurunkan nilai gas-gas fault, tetapi nilai-nilai tersebut akan kembali meningkat jika kegagalan transformator masih berlangsung. Oleh karena itu, diperlukan pemantauan yang cermat dan perbaikan pada transformator agar nilai gas fault dapat menurun secara berkelanjutan.

2.3 DGA (*Dissolved Gas Analysis*).

Dissolved Gas Analysis (DGA) adalah pengujian yang dilakukan pada minyak transformator untuk mengidentifikasi gas-gas terlarut yang umumnya tidak terdeteksi dalam analisis karakteristik minyak. Pemantauan gas-gas terlarut bertujuan untuk mengidentifikasi jenis kegagalan pada minyak transformator serta mencegah potensi kebakaran akibat gas-gas yang mudah terbakar. Pengujian DGA merupakan bagian dari monitoring kondisi transformator dan biasanya dilakukan setiap enam bulan, berdasarkan pengalaman lapangan.

Hasil dari pengujian DGA, seperti gas hidrogen, metana, karbon monoksida, karbon dioksida, asetilena, etana, dan etilen, akan meningkat seiring dengan kenaikan suhu transformator akibat pembebanan berlebih dan rugi transformator. Kenaikan suhu ini dapat mempercepat reaksi hidrokarbon dalam minyak transformator, terutama meningkatkan konsentrasi gas etana dan etilen yang sering kali disebabkan oleh logam yang menjadi panas. Dalam pengujian DGA, terdapat dua metode ekstraksi gas, yaitu:

1. Gas Chromatograph Method

Istilah "kromatografi" digunakan secara umum untuk menggambarkan proses pemisahan substansi antara dua fase (Walter, 1980). Metode Gas Kromatografi adalah teknik yang digunakan untuk mengekstrak atau memisahkan zat dalam bentuk gas dari suatu senyawa campuran. Dalam proses pemisahan ini, zat dipisahkan berdasarkan tingkat penguapannya. Kromatografi beroperasi dengan prinsip dasar bahwa jumlah zat terlarut berbeda untuk setiap komponen pada waktu tertentu ketika kesetimbangan terjadi antara fase diam dan fase gerak. Pemisahan menggunakan metode kromatografi dapat terjadi jika suatu molekul atau senyawa memiliki sifat-sifat yang berbeda, antara lain:

1. Memiliki kelarutan yang berbeda terhadap pelarut tertentu.
2. Memiliki sifat volatilitas yang berbeda pada temperatur yang berbeda.
3. Memiliki perbedaan dalam sifat kelarutan atau kemampuan untuk berikatan dengan fase diam.

2. Photo Acoustic Spectroscopy Method

Proses pengukuran menggunakan metode PAS dimulai dengan sumber radiasi yang menghasilkan gelombang elektromagnetik dalam bentuk sinar

inframerah. Radiasi tersebut kemudian dipantulkan oleh cermin parabola dan diarahkan ke piringan pemotong yang berputar dengan kecepatan konstan, menciptakan efek stroboskopik pada sumber cahaya. Setelah itu, radiasi ini diteruskan melalui filter optik, yang berfungsi secara selektif untuk meneruskan sinar dengan karakteristik tertentu sambil menghambat sinar yang tidak diinginkan (Afrianto, 2013).

Metode yang sering digunakan dalam analisis ini adalah gas kromatografi. Dengan metode ini, gas-gas yang terlarut dalam minyak transformator dapat dipisahkan, memungkinkan analisis kegagalan transformator melalui pengukuran jumlah masing-masing gas. Metode yang umumnya diterapkan dalam analisis hasil uji DGA adalah:

1. TDGC (*Total Dissolved Combustible Gas*)

Analisis jumlah total gas terlarut (TDCG) akan memberikan gambaran mengenai kondisi transformator sesuai dengan standar yang ditetapkan. Standar untuk jumlah gas terlarut berdasarkan IEEE Std. C57-104.1991 dapat dilihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Standar Jumlah Gas Terlarut IEEE Std. C57-104.1991.

BATASAN KONSENTRASI GAS TERLARUT (ppm)								
STATUS	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
KONDISI 1	100	120	35	50	65	350	2500	720
KONDISI 2	101-700	121-400	36-50	51-100	66-100	351-570	2501-4000	721-1920
KONDISI 3	701-1800	401-1000	51-80	101-150	101-150	571-1400	4001-10000	1921-4630
KONDISI 4	>1800	>1000	>80	>150	>150	>1400	>10000	>4630

Pada **kondisi 1**, transformator beroperasi dalam keadaan normal, tetapi pemantauan terhadap gas-gas tersebut tetap diperlukan.

Pada **kondisi 2**, tingkat TDCG mulai meningkat, menandakan potensi terjadinya gejala kegagalan yang perlu diwaspadai.

Pada **kondisi 3**, TDCG menunjukkan adanya dekomposisi pada isolasi kertas minyak transformator.

Sementara pada **kondisi 4**, TDCG mengindikasikan kerusakan yang lebih luas pada isolator kertas dan minyak transformator.

Nilai TDCG dihitung berdasarkan penjumlahan gas Hidrogen, Metan, Karbon Monoksida, Etilen, Etan, dan Asitelin. Gas yang paling berpengaruh terhadap nilai TDCG adalah karbon monoksida, yang disebabkan oleh peningkatan signifikan dalam konsentrasi gas tersebut.

2. *Key Gas*

Gas-gas yang terbentuk dalam transformator dapat digunakan secara kualitatif untuk mengidentifikasi jenis kegagalan yang terjadi, berdasarkan jenis gas tertentu yang lebih dominan pada suhu tertentu. Standar untuk mengidentifikasi jenis kegagalan berdasarkan analisis metode key gas dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Standar jenis kegagalan berdasarkan analisa metode Key Gas (IEEE Std. C57.104-1991).

Failure	Key Gas	Criteria	Gas Percent Amount
Overheating	H_2	Large amount of H_2 and C_2H_2 and concentrations of H_2 and C_2H_2 are high.	H_2 : 50% C_2H_2 : 15%
Overload	H_2	The amount of H_2 and C_2H_2 are high. The amount of C_2H_2 and C_2H_4 are high.	H_2 : 50% C_2H_2 : 15%
Insulation degradation	H_2	Large amount of H_2 and C_2H_2 and concentrations of H_2 and C_2H_2 are high.	H_2 : 50% C_2H_2 : 15%
Oil degradation	H_2	Large amount of H_2 and C_2H_2 and concentrations of H_2 and C_2H_2 are high.	H_2 : 50% C_2H_2 : 15%

3. *Roger's Ratio*

Kegagalan yang dapat terdeteksi melalui uji DGA diantaranya adalah :

PD = *Partial Discharge*

D1 = *Discharge* Energi Rendah

D2 = *Discharge* Energi Tinggi

T1 = *Thermal Faults* pada 20emperature $< 300^{\circ}\text{C}$

T2 = *Thermal Faults* pada 20emperature $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$

T3 = *Thermal Faults* pada 20emperature $> 700^{\circ}\text{C}$

Zona DT = Campuran *Thermal* dan *Electrical Fault*

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Pengujian

Metode penelitian yang diterapkan dalam skripsi ini melibatkan pengumpulan data dari hasil pengujian DGA, yang mencakup kadar gas H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , C_2H_2 , C_2H_4 , dan C_2H_6 yang terlarut dalam minyak transformator. Setelah data terkumpul, analisis hasil uji DGA dilakukan. Analisis ini menggunakan metode TDCG (Total Dissolved Combustible Gas) dan Roger's Ratio untuk menentukan jenis kegagalan yang terjadi pada minyak transformator. Berdasarkan jumlah total gas terlarut (TDCG) dalam minyak transformator, dihitung pula pertumbuhan gas per hari. Dengan menggunakan angka pertumbuhan gas terlarut harian tersebut, dapat diprediksi rentang waktu yang diperlukan untuk pemurnian minyak transformator.

3.2 Waktu Dan Lokasi Penelitian

Untuk melaksanakan penelitian ini, diperlukan data pendukung. Pengambilan data dilakukan di PLN (Persero) UIP3B Sumatera, khususnya di Unit Pelaksana Transmisi Medan di Gardu Induk Titi Kuning. Penelitian ini dilaksanakan dari bulan Juni hingga Juli 2024.

3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini meliputi:

1. Pengumpulan referensi dan teori terkait pengujian DGA (Dissolved Gas Analysis) dan proses purifikasi minyak transformator.
2. Pengambilan data mengenai konsentrasi gas hidrogen, metan, karbon monoksida, karbon dioksida, etilen, etan, asitelin, serta waktu terakhir purifikasi minyak pada transformator yang terletak di PLN (Persero) UIP3B Sumatera, Unit Pelaksana Transmisi Medan, di Gardu Induk Titi Kuning.

3. Untuk menghitung nilai TDCG, lakukan penjumlahan nilai H₂, CH₄, CO, C₂H₂, C₂H₄, dan C₂H₆ yang dinyatakan dalam satuan ppm, kemudian sesuaikan hasilnya berdasarkan tabel 2.4.

4. Menghitung nilai Roger's Ratio (rasio lima) dari data-data yang telah diperoleh dengan menggunakan rasio berikut:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}; \frac{CH_4}{H_2}; \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$$

5. Mengidentifikasi jenis kegagalan dari hasil rasio yang telah di dapat berdasarkan tabel 2.6.

6. Memprediksi rentang waktu purifikasi minyak trafo.

3.4 Spesifikasi Transformator

Transformator yang digunakan dalam penelitian ini adalah transformator tiga fase buatan Alsthom Savoisiennne dengan spesifikasi 50 Hz, 27 KV/11 KV, yang berarti transformator ini berfungsi sebagai transformator step-down. Sistem pendinginan yang digunakan adalah OFAF (Oil Forced Air Forced). Minyak transformator dipompa dan disirkulasikan melalui radiator, di mana setiap radiator dilengkapi dengan kipas pendingin untuk membantu proses perpindahan panas

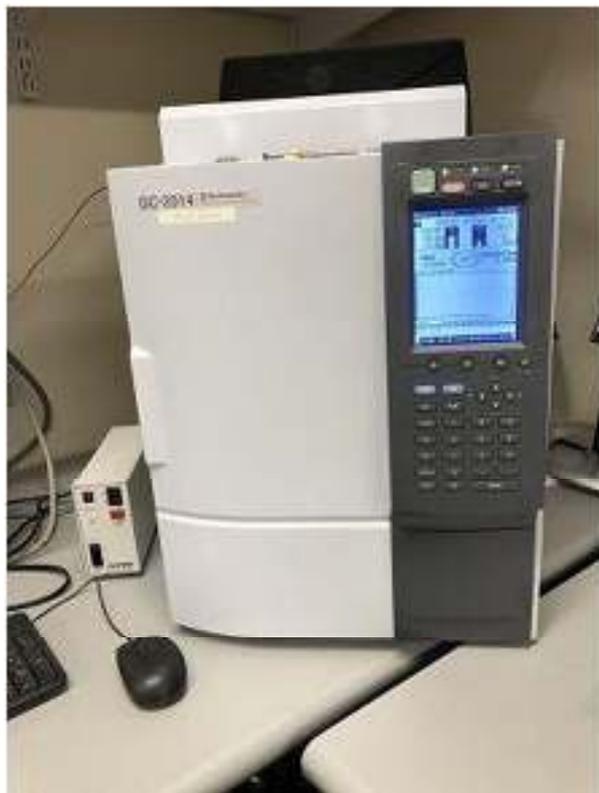


dari minyak ke udara. Nama plate transformator dapat dilihat pada gambar 4.1.

Gambar 3.1 *Name Plate* Transformator

3.5 Alat Uji DGA

Alat uji DGA yang digunakan pada penelitian ini yaitu DGA Test Shimadu GC – 2014. Alat ini dapat mengukur 7 gas terlarut dalam minyak transformator secara terpisah. Singkatan GC pada nama Shimadu dikarenakan alat ini menggunakan metode ekstraksi *Gas Chromatograph*.



Gambar 3.2 Shimadu GC-2014.

3.6 Pengambilan Sampel Minyak Transformator

Pengambilan sampel minyak untuk pengujian DGA sangat penting untuk memastikan akurasi diagnosis yang diperoleh. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pengambilan sampel minyak meliputi:

- a. Peralatan yang digunakan untuk pengambilan sampel minyak.
- b. Prosedur pengambilan sampel minyak.

c. Durasi waktu antara pengambilan sampel minyak dan pelaksanaan pengujian.

3.6.1 Alat Yang Digunakan Dalam Pengambilan Sampel Minyak

a. Syringe

Adalah alat suntik yang terbuat dari kaca yang digunakan untuk mengambil sampel minyak transformator. Tujuan penggunaan syringe adalah untuk mencegah kontaminasi minyak dengan udara dan polutan eksternal, serta untuk menghindari kehilangan gas-gas ringan yang mudah menguap, seperti hidrogen.

b. Oil Flushing Unit

Sebuah unit yang terdiri dari selang silikon, flange, seal, dan kran penghenti yang berfungsi sebagai alat untuk membuang minyak transformator yang kotor serta mengambil sampel minyak.

c. Vial

Botol kimia yang digunakan untuk menampung sampel minyak yang telah diambil. Sebelum digunakan, vial harus dipastikan bersih dan dalam kondisi vakum (kedap udara).

3.6.2 Tata Cara Pengambilan Sampel Minyak Transformator

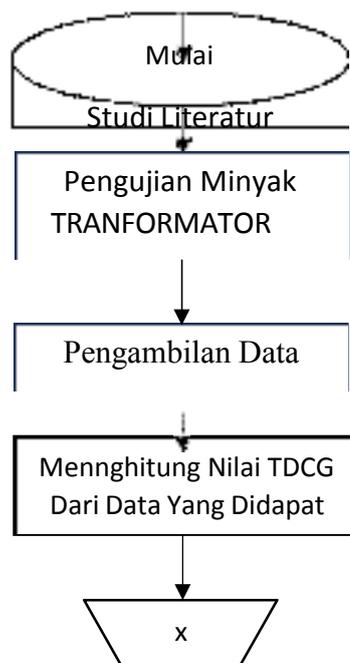
Berikut adalah langkah-langkah untuk pengambilan sampel minyak transformator dalam rangka pengujian DGA:

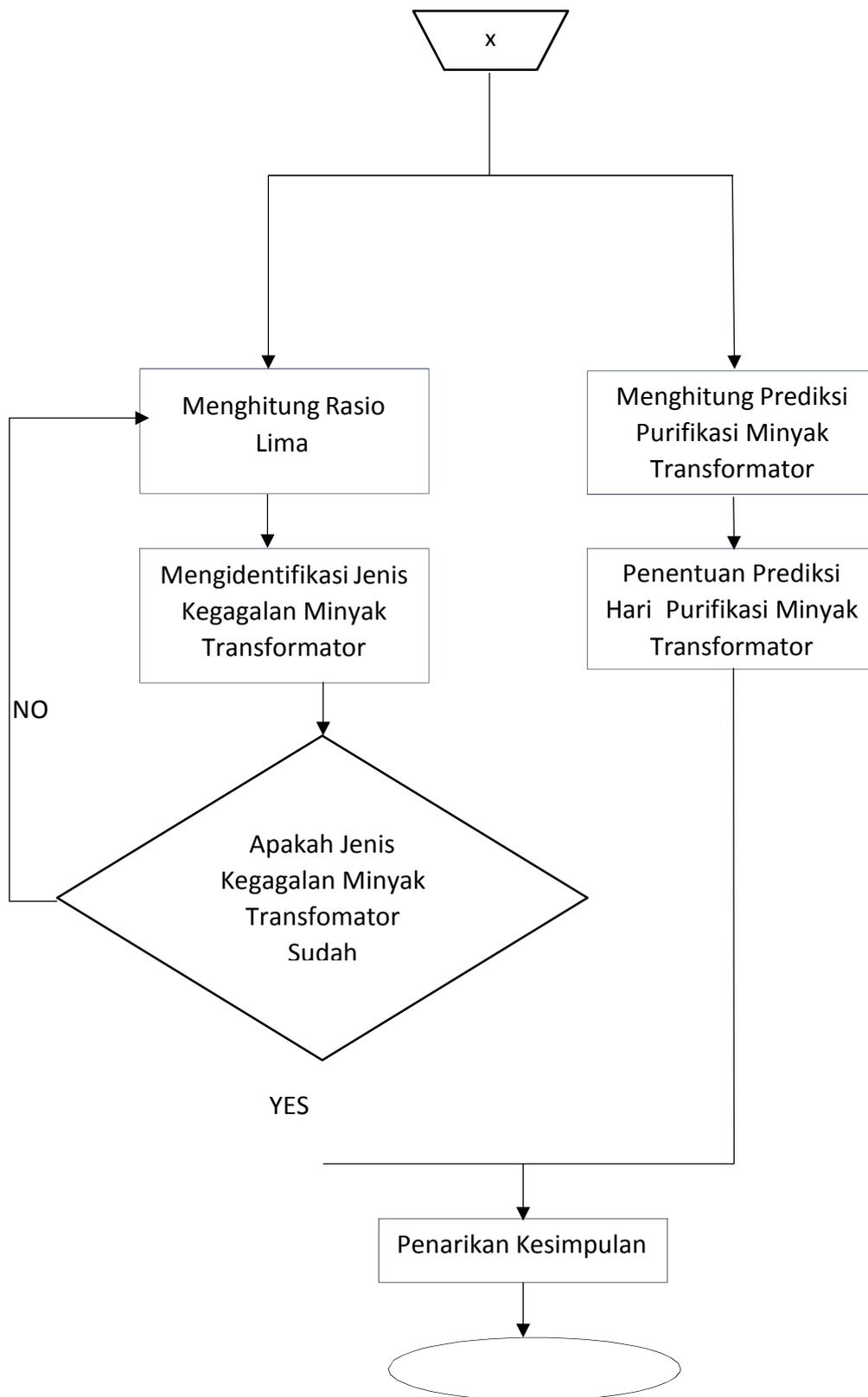
1. Buka katup drain pada tangki utama transformator.
2. Lakukan pembersihan terlebih dahulu dengan mengeluarkan minyak dari tangki utama transformator dengan membuka kran.
3. Tutup kembali kran.
4. Pasang jarum pada syringe.
5. Buka katup pada syringe dan masukkan syringe ke dalam selang silikon.
6. Sedot minyak dari kran.
7. Pastikan tidak ada udara atau gelembung udara yang masuk ke dalam syringe.
8. Tutup kembali katup pada syringe.
9. Pindahkan minyak ke dalam botol vial dengan menyuntikkan minyak ke dalam botol vial tanpa membuka tutupnya.

10. Ambil sampel minyak sebanyak 12 ml untuk pengujian DGA.
11. Ulangi proses yang sama untuk mengambil sampel dari bagian bawah tangki utama dan OLTC.
12. Beri label pada tabung vial.
13. Simpan sampel minyak dan lindungi dari panas serta sinar matahari langsung.
14. Bersihkan syringe menggunakan minyak, kemudian keringkan dan simpan pada tempatnya.
15. Lepaskan jarum dari syringe.
16. Tutup kembali katup drain pada tangki utama transformator.
17. Buka kran untuk mengeluarkan sisa minyak dari unit pembersih minyak.
18. Lepaskan unit pembersih minyak dari katup drain tangki utama transformator.
19. Pastikan katup drain terpasang dengan benar dan kuat.
20. Proses pengambilan sampel minyak transformator untuk pengujian DGA selesai.

3.7 Flowchart

Tahapan penelitian tersebut dapat digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flowchart*) penelitian seperti pada gambar 3.1 berikut.





Gambar 3.3 *Flowchart* Penelitian.

Berikut adalah langkah-langkah yang ada dalam flowchart:

1. Mulai, proses penelitian dimulai.
2. Studi literatur, penelitian mengumpulkan dan mempelajari literatur yang relevan dengan topik penelitian.
3. Pengambilan data, data yang diperlukan untuk analisis dikumpulkan. Data ini bisa berupa hasil pengukuran, observasi, atau dari sumber lain.
4. Menghitung nilai TDCG dari data yang didapat, data yang sudah diolah untuk menghitung nilai TDCG.
5. Menghitung rasio lima, selain TDCG rasio lima juga dihitung. Rasio lima adalah perbandingan gas-gas tertentu dalam minyak transformator.
6. Mengidentifikasi jenis kegagalan, berdasarkan hasil perhitungan rasio lima maka jenis kegagalan minyak transformator dapat diketahui.
7. Apakah jenis kegagalan minyak transformator sudah teridentifikasi? Apabila jenis kegagalan minyak transformator belum teridentifikasi maka perlu diulang untuk menghitung rasio lima dan jika jenis kegagalan minyak transformator sudah teridentifikasi maka dapat dilanjutkan ke penarikan kesimpulan.
8. Menghitung prediksi purifikasi minyak transformator, dengan menggunakan data yang sudah diolah, peneliti memprediksi kapan minyak transformator perlu di purifikasi.
9. Penentuan prediksi hari purifikasi, hasil prediksi dijabarkan menjadi hari yang spesifik kapan proses purifikasi minyak transformator sebaiknya dilakukan.
10. Penarikan kesimpulan, semua hasil analisis disimpulkan.
11. Selesai, proses penelitian selesai.